

О. М. Шинкарук, д-р техн. наук, проф.;  
Л. В. Карпова

## ТРАНСФОРМУВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ІМПУЛЬСНИХ РАДІОСИГНАЛІВ З УРАХУВАННЯМ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИХ ФЛУКТУАЦІЙ

Досліджено питання трансформування кореляційних властивостей радіолокаційних сигналів з урахуванням недетермінованих в періоді зондування амплітудних та кутових складових. Аналіз отриманих аналітичних виразів функцій невизначеності сигналів з випадковими складовими в комплексній обвідній показало, що, оцінюючи їх кореляційні властивості при прийомі сигналу, відкриваються нові потенційні можливості щодо розрізнення ехо-сигналів від групових цілей.

### Вступ

В процесі реалізації методів активної радіолокації, основним і єдиним носієм інформації про наявність і параметри цілей в зоні огляду є зондувальні сигнали, при цьому саме їх властивості, в першу чергу, визначають основні характеристики радіолокаційних засобів в цілому [1]. З цієї причини основні зусилля інженерів в процесі розробки радіолокаційних засобів були спрямовані на пошук зондувальних сигналів з оптимальними характеристиками [2, 3]. В першу чергу, намагались оптимізувати кореляційні властивості сигналів, оскільки пропорційною їм є ефективність узгоджених (оптимальних) методів їх обробки. У разі ускладнення зондувальних сигналів значно підвищувались вимоги до передавачів, оскільки неточність в відтворенні складних сигналів значно більше знижує ефективність алгоритмів обробки, ніж у разі використання простих зондувальних імпульсів. Проте, незважаючи на те, що в сучасній радіолокації існує жорстке правило, відповідно до якого ступінь розрізнення ехо-сигналу не може перевищувати ступінь розрізнення зондувального [1, 3], в багатьох роботах показано, що існування різних дестабілізуювальних факторів під час формування зондувальних сигналів приводить до появи в них певних позитивних властивостей [4, 5]. Не зважаючи на те, що в межах періоду зондування вони є за природою недетермінованими, кореляція ехо-сигналів значно відрізняється від кореляції зондувальних, а це відкриває потенційні можливості підвищення низки характеристик радіолокаційних засобів активного та напівактивного типу.

Ехо-сигнал по відношенню до зондувального трансформується в декілька етапів (рис. 1). По-перше, ще під час формування, в результаті дії багатьох дестабілізуювальних факторів, реальна форма сигналу з певною похибкою повторює задану, по-друге, під час відбиття від поверхні цілі за певних умов в сигнал можуть вноситись значні як амплітудні, так і кутові спотворення.

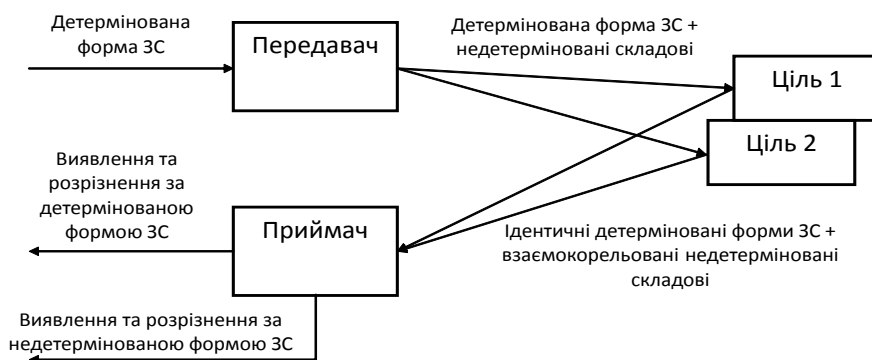


Рис. 1. Схема формування та реалізації детермінованих і недетермінованих складових радіолокаційних сигналів

Математична модель зондувального радіосигналу в загальному випадку може бути подана виразом

$$u(t) = U(t) \cos(\omega_0 t + \phi(t) + \phi_0), \quad (1)$$

де  $U(t)$  — амплітудна модульовальна складова;  $\phi(t)$  — кутова модульовальна складова;  $\phi_0$  — початкова фаза несучого коливання;  $\omega_0$  — частота несучого коливання.

Ця модель містить дві модульовальні складові: модульовальний сигнал за амплітудою і модульовальний сигнал за фазою або частотою, які в сукупності і визначають можливості ехо-сигналів по розрізненню. Проте, у випадку імпульсної радіолокації, коли в якості зондувальних сигналів використовуються радіоімпульси короткої тривалості з прямокутною обвідною і без внутрішньої кутової модуляції,

$$\phi(t) = 0, \quad U(t) = \begin{cases} U_0, & 0 \leq t \leq \tau_i; \\ 0, & t < 0, t > \tau_i, \end{cases} \quad (2)$$

форма комплексної обвідної, а відповідно і кореляційні властивості сигналу визначаються виключно параметрами модульовального імпульсу  $U(t)$

$$\dot{U} = \begin{cases} U_0 e^{j\phi_0}, & 0 \leq t \leq \tau_i; \\ 0, & t < 0, t > \tau_i, \end{cases} \quad (3)$$

під форму якого в результаті розробляється і сам алгоритм оброблення в приймачі.

Якщо врахувати дію дестабілізуючих факторів у передавачі під час формування зондувальних сигналів, математична модель зондувального сигналу містить низку флуктуаційних амплітудних і кутових складових, які діють на сигнал як адитивно, так і мультиплікативно. При цьому модель сигналу можна записати у вигляді

$$u(t) = U'(t) \cos(\omega_0 t + \phi'(t) + \phi_0); \quad (4)$$

$$U'(t) = n(t) + U(t)(1 + \xi(t)),$$

де  $n(t)$  і  $\xi(t)$  — відповідно адитивна і мультиплікативна амплітудні складові сигналу;  $\phi'(t)$  — флуктуаційна кутова складова.

Враховуючи алгоритми роботи імпульсних радіолокаційних засобів (наявність антенного перемикача) і некорельованість адитивної складової (білого шуму) в амплітудно-модульовальній суміші, нею можна знехтувати. Отже, модель зондувального радіолокаційного сигналу може бути подана у вигляді

$$u(t) = \begin{cases} U(t)(1 + \xi(t)) \cos(\omega_0 t + \phi'(t) + \phi_0), & 0 \leq t \leq \tau_i; \\ 0, & t < 0, t > \tau_i. \end{cases} \quad (5)$$

Потенційні можливості такої моделі сигналу щодо розрізнення можна оцінити шляхом виведення та дослідження кореляційної функції комплексної обвідної, модуль якої в двовимірній інтерпретації називається функцією невизначеності [2]. Комплексна обвідна моделі сигналу з урахуванням недетермінованих складових, має також недетерміновану форму, оскільки окрім закладених модуляційних складових сигнал містить і випадкові. Вираз для комплексної обвідної такої моделі сигналу має вигляд

$$\dot{U} = U'(t)\xi(t)e^{j\phi'(t)}e^{j\phi_0};$$

$$\dot{U} = \begin{cases} U_0(1 + \xi(t))e^{j\phi_0}e^{j\phi(t)}, & 0 \leq t \leq \tau_i; \\ 0, & t < 0, t > \tau_i. \end{cases} \quad (6)$$

### Основна частина

Враховуючи різні можливі варіації законів розподілу  $\xi(t)$ ,  $\phi'(t)$  та велику множину значень їх параметрів, розглянемо найпритаманніші імпульсним радіолокаційним системам випадки [2]. Враховуючи конструктивні та функціональні особливості передавачів імпульсних радіолокаційних станцій, під час модуляції НВЧ коливань форма амплітудної обвідної може бути у вигляді прямокутного імпульсу:

$$\xi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq \tau_i; \\ 0, & t < 0, t > \tau_i \end{cases} \quad (7)$$

або гаусівського

$$\xi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_u}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_u^2}\right). \quad (8)$$

При цьому кутова модуляція через нестабільність вузлів передавача може бути у вигляді лінійної частотної модуляції:

$$\phi(t) = bt^2 \quad (9)$$

параболічної частотної модуляції

$$\phi(t) = ct^3, \quad (10)$$

або без неї

$$\phi(t) = 0. \quad (11)$$

За своїм визначенням функція невизначеності сигналу є модулем кореляційної функції його комплексної обвідної [1]

$$\chi(\tau, \Omega) = \left| \frac{1}{2E} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} U^*(t) \cdot U(t - \tau) \exp(j2\pi\Omega t) dt \right|, \quad (12)$$

де  $E$  — повна енергія сигналу;  $\Omega$  — зміщення сигналу по вісі частот;  $\tau$  — зміщення сигналу по вісі часу.

Далі в роботі розглядається нормована функція невизначеності, що є відношенням поточного значення за координатами  $\tau$ ,  $\Omega$  до максимального і визначається з виразу

$$\chi(\tau, \Omega) = \frac{\left| \frac{1}{2E} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} U^*(t) U(t - \tau) \exp(j2\pi\Omega t) dt \right|}{\chi(0, 0)}. \quad (13)$$

Отже, вирази функцій невизначеності для різних комбінацій флуктуаційних складових визначаються підстановкою рівнянь (7), (9)—(11) у вираз (6) з подальшим розв'язанням рівняння (13).

Отже, провівши підстановки та виконавши математичні перетворення, отримано вирази для функцій невизначеності сигналів [3]:

— з прямокутною обвідною без частотної модуляції:

$$\chi(\tau, \Omega) = \begin{cases} \frac{\sin \pi\Omega(\tau_i - |\tau|)}{\pi\Omega(\tau_i - |\tau|)} \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_i}\right), & -\tau_i \leq \tau \leq \tau_i; \\ 0, & \tau \leq -\tau_i, \tau \geq \tau_i; \end{cases} \quad (14)$$

— з прямокутною обвідною і лінійно-частотною модуляцією:

$$\chi(\tau, \Omega) = \begin{cases} \frac{\sin \left[ b\tau(\tau_i - |\tau|) - \pi\Omega(\tau_i + |\tau|) \right]}{b\tau(\tau_i - |\tau|) - \pi\Omega(\tau_i + |\tau|)} \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_i}\right), & -\tau_i \leq \tau \leq \tau_i; \\ 0, & \tau \leq -\tau_i, \tau \geq \tau_i; \end{cases} \quad (15)$$

— з прямокутною обвідною і параболічною частотною модуляцією:

$$\chi(\tau, \Omega) = \begin{cases} \frac{1}{\tau_i} \sqrt{\frac{\pi}{6c\tau} \left[ (C_1 + C_2) + (S_1 + S_2)^2 \right]^{1/2}}, & -\tau_i \leq \tau \leq \tau_i; \\ 0, & \tau \leq -\tau_i, \tau \geq \tau_i, \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{де } C_n = \int_0^{x_n} \cos(\pi y^2) dy, \quad S_n = \int_0^{x_n} \sin(\pi y^2) dy; \quad \left. \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \end{matrix} \right\} = -\left(\frac{\pi}{6c\tau}\right)^{1/2} \Omega \pm \frac{1}{2} \left(\frac{6c\tau}{\pi}\right)^{1/2} (\tau_i - |\tau|).$$

Проте, найрозповсюдженішим для імпульсних радіолокаційних засобів є випадок, коли амплі-

тудна обвідна радіоімпульсу має не прямокутну, а гаусівську форму. Вирази функцій невизначеності для різних комбінацій флуктуаційних складових визначаються також шляхом підстановки рівнянь, (8)—(11) у вираз (6) з подальшим розв'язанням рівняння (13).

Отже, провівши підстановки та виконавши математичні перетворення, отримано вирази для функцій невизначеності сигналів [3]:

— з гаусівською обвідною без частотної модуляції:

$$\chi(\tau, \Omega) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\tau^2}{2\sigma_u^2} + 2\pi^2\Omega^2\sigma_u^2\right)\right]; \tag{17}$$

— з гаусівською обвідною і лінійно-частотною модуляцією:

$$\chi(\tau, \Omega) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\tau^2}{2\sigma_u^2} + 2\pi^2\Omega^2\sigma_u^2\left(\Omega + \frac{b\tau}{\pi}\right)^2\right)\right]; \tag{18}$$

— з гаусівською обвідною і параболічною частотною модуляцією:

$$\chi(\tau, \Omega) = \left(\frac{1}{1 + (3c\sigma_u^2)^2 \tau^2}\right)^{\frac{1}{4}} \exp\left[-\left(\frac{\tau^2}{\sigma_u^2} + \frac{2\pi^2\Omega^2}{\frac{1}{\sigma_u^2} - 9c^2\tau^2}\right)\right]. \tag{19}$$

Якщо порівнювати вирази (15)—(19) з виразом (14), то є очевидним той факт, що враховуючи флуктуаційні складові як за амплітудою, так і за частотою, функція невизначеності значно трансформується (рис. 2—5)

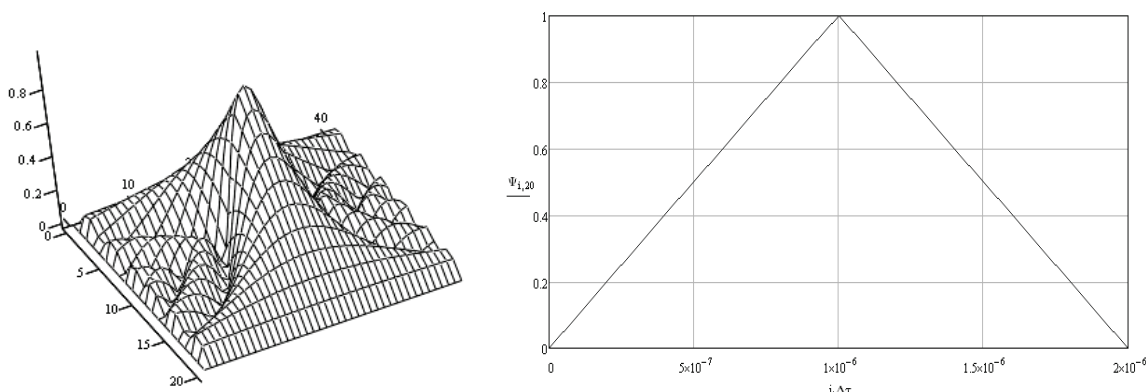


Рис. 2. Функція невизначеності прямокутного радіоімпульсу :  
а — поверхня; б — її перетин площиною  $\Omega = 0$

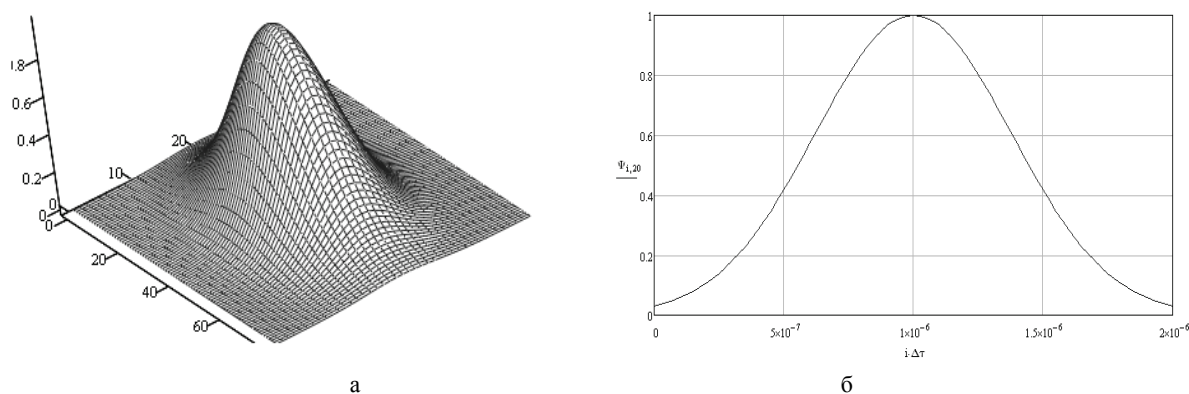
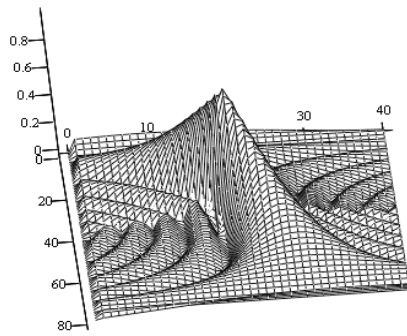
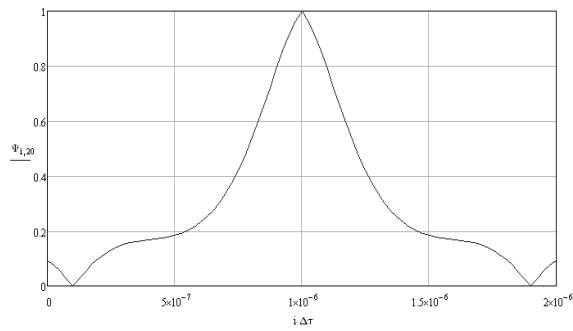


Рис. 3. Функція невизначеності гаусівського радіоімпульсу:  
а — поверхня; б — її перетин площиною  $\Omega = 0$

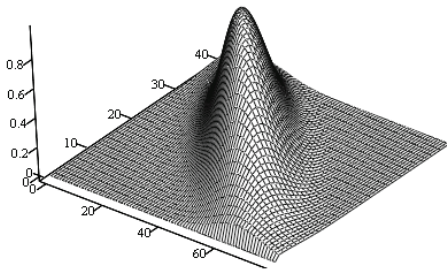


а

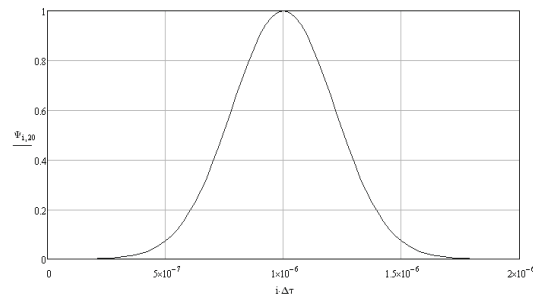


б

Рис. 4. Функція невизначеності прямокутного ЛЧМ-радіоімпульсу:  
а — поверхня; б — її перетин площиною  $\Omega = 0$



а



б

Рис. 5. Функція невизначеності гаусівського ЛЧМ-радіоімпульсу:  
а — поверхня; б — її перетин площиною  $\Omega = 0$

### Висновки

Враховуючи, що імпульси з прямокутною амплітудною обвідною та з монотонним частотним заповненням мають найгладкішу як за часом, так і за частотою поверхню невизначеності, внесення будь-якої додаткової динамічної складової приводить до оптимізації (за шириною основної пелюстки) поверхні функції невизначеності і до покращення або погіршення за рівнем бокових пелюсток.

В реальних імпульсних радіолокаційних системах величина амплітудних та частотних флуктуацій зондувальних сигналів може сягати декількох відсотків [4], що в реалізації кореляційних методів обробки ехо-сигналів відкриває потенційні можливості збільшення характеристик виявлення. Крім того, як показує аналіз отриманих виразів функцій невизначеності, властивості зондувальних сигналів суттєво залежать не тільки від виду законів розподілу флуктуацій, але й від параметрів цих законів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вопросы перспективной радиолокации : кол. моногр. / под редакцией А. В. Соколова. — М. : Радиотехника, 2003 — 512 с.
2. Вамберский М. В. Передающие устройства СВЧ : учеб. пос. для радиотехнических спец. вузов / М. В. Вамберский, В. И. Казанцев, С. А. Шелухин; под ред. М. В. Вамберского. — М. : Высшая школа, 1984. — 448 с.
3. Кравченко В. Ф. Алгебра логики, атомарные функции и вейвлеты в физических приложениях / В. Ф. Кравченко, В. Л. Рвачев. — М. : ФИЗМАЛИТ, 2006. — 416 с.
4. Шинкарук О. М. Обробка радіолокаційних сигналів з урахуванням внутрішньоімпульсних фазочастотних нестабільностей / О. М. Шинкарук, І. І. Чесановський // зб. наук. пр. Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка / за ред. С. В. Ленкова. — Вип. № 17. — К. : ВІКНУ, 2009 — С. 89—92.
5. Чесановський І. І. Трансформування функції невизначеності радіосигналів з урахуванням внутрішньоімпульсної фазочастотної нестабільності / І. І. Чесановський // Збірник наукових праць Національна академія Державної прикордонної служби України ім. Б. Хмельницького / за ред. В. О. Балашова. — Хмельницький : НАДПСУ, 2009. — № 50. — С. 58—62.

Рекомендована кафедрою радіотехніки

Стаття надійшла до редакції 10.03.11

Рекомендована до друку 24.03.11

**Шинкарук Олег Миколайович** — завідувач кафедри; **Карпова Лєся Вікторівна** — інженер.

Кафедра радіотехніки та зв'язку, Хмельницький національний університет, Хмельницький